

加力燃烧室火焰稳定装置流阻特性数值研究

陈翔, 王一搏, 刘云鹏, 颜应文

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为降低加力燃烧室的流阻损失,避免发动机推力降低与耗油率上升,采用经试验数据验证的数值计算方法,研究了凹腔与支板两类火焰稳定装置结构参数变化对流场结构和流阻损失的影响规律,分析了火焰稳定器结构参数对回流率以及总压恢复系数的影响。所研究的加力燃烧室进口马赫数为0.385,凹腔火焰稳定装置倾斜角度范围为 40° ~ 90° ,深度为37~77 mm,支板火焰稳定器宽度范围为29~41 mm,尾缘扩张角度为 0° ~ 15° 。研究表明:凹腔倾斜角度对流场形态的影响较小,起主要影响的结构参数是凹腔深度,总压恢复系数随凹腔深度减小而逐渐增加;支板宽度减小会导致加力燃烧室内的回流区减小,总压恢复系数则单调增加;相较于中心锥回流区,支板尾缘和凹腔后回流区涡流强度更大,对流阻损失的影响更大;随支板火焰稳定器尾缘扩张角的增大,支板尾缘回流区变大,而凹腔-中心锥回流区由于受到压缩而逐渐减小,在扩张角度约为 3.5° 时总压恢复系数最大。

关键词:加力燃烧室;火焰稳定装置;流阻特性;结构参数;总压恢复系数

中图分类号:V231.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.07.008

[引用本文格式]陈翔,王一搏,刘云鹏,等.加力燃烧室火焰稳定装置流阻特性数值研究[J].热能动力工程,2024,39(7):62-71. CHEN Xiang, WANG Yibo, LIU Yunpeng, et al. Numerical study on flow resistance characteristics of flame holder in an afterburner[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(7): 62-71.

Numerical Study on Flow Resistance Characteristics of Flame Holder in an Afterburner

CHEN Xiang, WANG Yibo, LIU Yunpeng, YAN Yingwen

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016)

Abstract: To reduce wastage of engine thrust and fuel caused by the afterburner flow resistance loss, the influence of the structural parameter change of flame holders of cavity and strut on the flow field structure and flow resistance loss was studied by a numerical calculation method which had been verified by experimental data. The effect of the structural parameters of the flame holder on the reflux rate and total pressure recovery coefficient was analyzed. The Mach number at the inlet of the proposed afterburner was 0.385. The inclined angle range of the cavity flame holder was 40° to 90° with a depth of 37 to 77 mm. The width range of the strut flame holder was 29 to 41 mm with a trailing edge expansion angle of 0° to 15° . The results show the cavity depth influences the flow field more significantly rather than cavity inclined angle. And the total pressure recovery coefficient increases when the cavity depth decreases. With the decreasing of strut width, the recirculation zone in the afterburner shrinks, while the total pressure recovery coefficient increases monotonously. Compared with the central cone recirculation zone, the recirculation zones at the tailing edge of the strut and behind the cavity have greater impact on the flow resist-

收稿日期:2023-10-07; 修订日期:2023-11-03

基金项目:国家科技重大专项(J2019-III-0004-0047)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (J2019-III-0004-0047)

作者简介:陈翔(1998-),男,南京航空航天大学硕士研究生。

通信作者:刘云鹏(1992-),男,南京航空航天大学讲师。

ance loss with stronger vortex intensity. The recirculation zone at the tailing edge of strut grows and the integrated recirculation zone in cavity and central cone shrinks gradually caused by compression, with the incremental strut flame holder trailing edge expansion angle, which leads to the maximum total pressure recovery coefficient at expansion angle of about 3.5° .

Key words: afterburner, flame holder, flow resistance characteristics, structural parameters, total pressure recovery coefficient

引言

在传统加力燃烧室中,常采用V型火焰稳定器^[1]、沙丘稳定器^[2]等火焰稳定装置来保证火焰的稳定燃烧并进行传焰。但在应对较为恶劣的进口来流条件时单一火焰稳定装置,往往会产生过大的流阻损失^[3-4],使发动机推力降低,耗油率上升。

为了降低流阻损失以及增强火焰稳定装置的性能,如组合驻涡稳定器与径向稳定器^[5]、应用凹腔驻涡原理的新型内突扩加力燃烧室^[6]等方案被提出。部分学者也针对凹腔与支板组合耦合机制^[7]以及该组合对燃烧室性能的影响开展了研究^[8-10]。相较于组合方案,自从一体化加力燃烧室设计的思想被首次^[11]提出以来,国内外学者在一体化加力燃烧室多结构一体化设计、流动特性与实际应用等方面取得了许多成果。孙雨超等人^[12]提出了一种与涡轮后框架一体化的加力燃烧室方案,该方案能够较好地组织加力燃烧室内的燃烧,使出口截面温度分布更均匀。江琴^[13]通过数值模拟方法研究发现,具有较大扩张比的一体化加力燃烧室流阻损失小、总压恢复能力强且流场流动特性好。扭转支板相比于平直支板,其加力燃烧室的流阻特性和流场特性均更好。尾部带V型槽的支板不仅能够大幅度减小加力燃烧室的流阻损失,而且能较好地改善流场流动特性,加快火焰的传播提高燃烧效率。朱赞等人^[14]通过试验研究发现,光滑、堵塞比小的单杆杆件可以有效降低流阻损失。但是采用不同的火焰稳定装置往往会使得加力燃烧室中的流场产生差异,并且火焰稳定装置结构参数的不同,使加力燃烧室中的流阻特性也不同。

在较为常用的与涡轮后框架支板、稳定器、喷油杆一体化加力燃烧室设计^[15]的基础上,本文采用数值计算的方法,研究凹腔与支板两类火焰稳定装置结构参数变化对加力燃烧室流场结构和流阻损失的

影响规律,分析火焰稳定器结构参数与回流率以及总压恢复系数之间的关系,以为低流阻一体化加力燃烧室的设计提供参考。

1 研究对象

本文的研究对象为一体化加力燃烧室凹腔与支板火焰稳定器,其主要结构如图1所示。

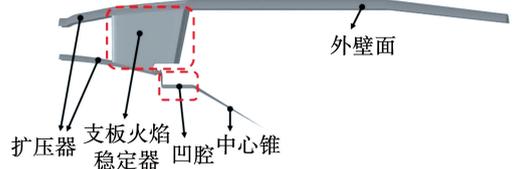


图1 一体化加力燃烧室结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integrated afterburner structure

1.1 凹腔火焰稳定装置

凹腔火焰稳定装置为半凹腔型式的内凹腔结构。一般认为凹腔长深比是影响凹腔流场结构的主要因素^[16-17],但是对于半凹腔型式内凹腔结构而言,倾斜角度 γ 和凹腔深度 h 是主要的结构参数。本文研究的凹腔火焰稳定装置倾斜角度范围为 $40^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$,深度范围 $37 \text{ mm} \leq h \leq 77 \text{ mm}$ 。凹腔火焰稳定装置结构参数如表1所示。

表1 凹腔火焰稳定装置结构参数

Tab. 1 Structural parameters of flame holder in cavity

凹腔倾斜角度 $\gamma / (^\circ)$	凹腔深度 h / mm
40	47
50	47
60	37
60	47
60	57
60	67
60	77
70	47
80	47
90	47

为了排除上游环型扩压器以及支板火焰稳定器的干扰,独立研究凹腔火焰稳定装置结构参数对流场的影响规律,设计了如图 2 所示的矩形流道。

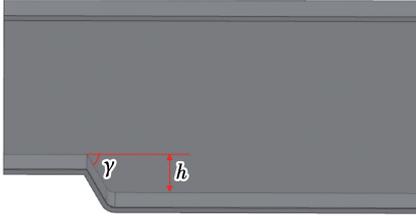


图 2 矩形流道凹腔结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the rectangular channel cavity structure

1.2 支板火焰稳定器

支板火焰稳定器结构如图 3 所示。采用 NACA 65 系列^[18]原始叶型作为支板火焰稳定器前缘,支板火焰稳定器宽度范围为 $29 \text{ mm} \leq D \leq 41 \text{ mm}$,尾缘扩张角度范围为 $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ 。支板火焰稳定器结构参数如表 2 所示。统计得到一体化加力燃烧室扩压流道中最大阻塞比变化范围为 $0.233 \sim 0.330$ 。

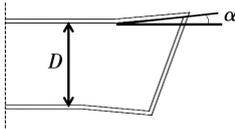


图 3 支板火焰稳定器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of strut flame holder structure

表 2 支板火焰稳定器结构参数

Tab. 2 Structural parameters of strut flame holder

支板宽度 D/mm	支板尾缘扩张角度 $\alpha/(\text{°})$	最大阻塞比
29	5	0.233
32	5	0.257
35	0	0.281
35	5	0.281
35	8	0.281
35	12	0.281
35	15	0.281
38	5	0.306
38	5	0.330
41	5	0.330

2 数值模拟方法

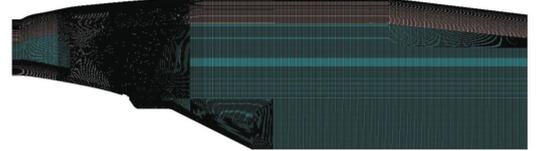
2.1 计算模型及网格划分

使用商业软件 ANSYS FLUENT 进行数值计算,

气体性质为可压缩理想气体,湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型,壁面函数为标准壁面函数,求解器采用隐式分离求解器 SIMPLE 算法。一体化加力燃烧室计算域及网格划分如图 4 所示。对一体化加力燃烧室采用结构/非结构混合网格划分计算域,经过网格无关性验证,计算域网格总数为 786 万;矩形流道凹腔结构计算网格总数为 189 万。



(a) 一体化加力燃烧室计算域



(b) 一体化加力燃烧室计算网格



(c) 矩形流道凹腔结构计算网格

图 4 一体化加力燃烧室计算域及网格划分

Fig. 4 Computational domains and mesh divisions of integrated afterburner

2.2 边界条件

进口为质量流量进口,出口为压力出口,出口压力为 $101\,325 \text{ Pa}$,外壁面为无滑移固体壁面,两侧壁面为周期性边界条件。一体化加力燃烧室进口马赫数 $Ma = 0.385$,经过预计算得到矩形流道内凹腔火焰稳定装置当地马赫数 $Ma = 0.218$,将两者分别作为加力燃烧室和矩形流道凹腔结构的进口气流条件。进口气流参数如表 3 所示。

表 3 进口气流参数

Tab. 3 Inlet airflow parameters

计算域	Ma	总温/K	质量流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
矩形流道	0.218	308	3.93
一体化加力燃烧室	0.385	308	4.21

2.3 数值方法验证

选用图 1 所示的一体化加力燃烧室基准试验件的试验数据对数值计算方法进行验证,数值计算采

用的结构参数以及进出口参数均与试验工况保持一致。

图5为试验件在支板间中心截面上的速度分布云图与流线图。从图5可以看出,进口气流在进入一体化加力燃烧室后,支板火焰稳定器尾缘处以及凹腔突扩段均存在较小的低速回流区,截面上的流动速度沿径向方向的阶梯分布比较明显。数值模拟结果与试验结果基本符合。

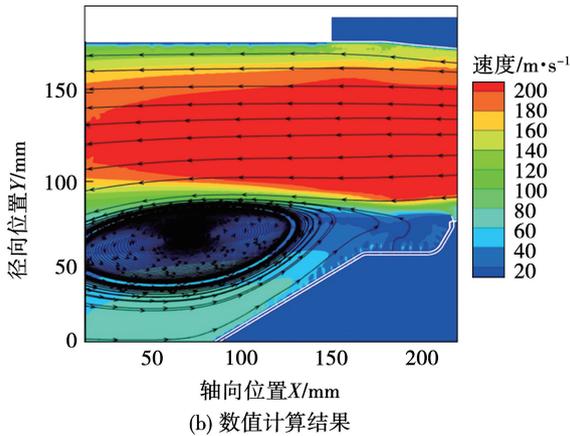
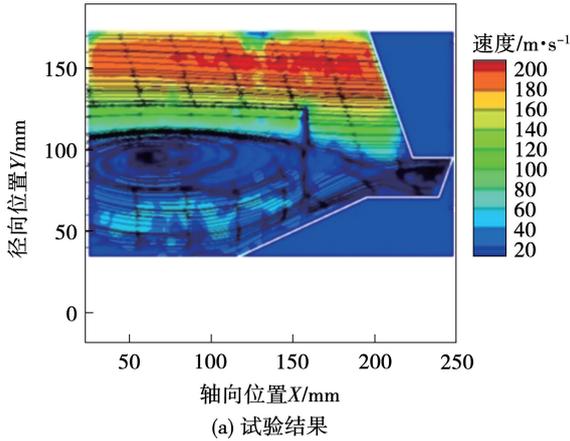


图5 试验件支板间中心截面速度分布云图与流线图
Fig.5 Velocity contours and streamlines on central section between the struts of test sample

图6为试验件沿程静压分布。从图6可以看出,数值计算所得沿程静压分布及数值与试验测量结果差异不大,均在沿程距离230 mm处静压骤降,随后呈现持续上升的趋势。

表4为总压恢复系数统计。从表中可以看出,试验测量与数值计算所得总压恢复系数 σ 均在97%之上,且相对误差仅为0.23%,两者吻合较好。

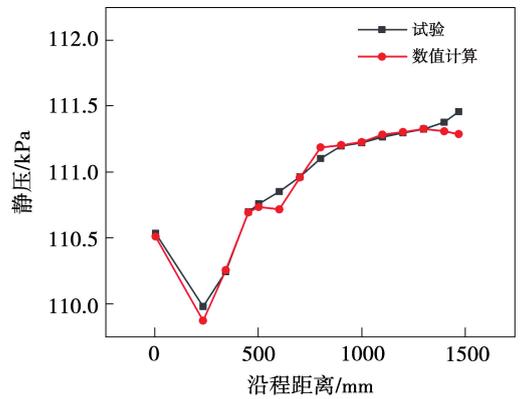


图6 试验件沿程静压分布

Fig.6 Static pressure distribution of test sample along the flow direction

表4 试验件总压恢复系数

Tab.4 Total pressure recovery coefficient of test sample

参数	试验	数值仿真
总压恢复系数 σ	0.974 1	0.976 3
相对误差/%	0	0.23

通过对比流场、沿程静压分布和总压恢复系数的计算结果与试验结果,验证了数值计算方法的合理性。

3 计算结果与分析

3.1 凹腔火焰稳定装置流场特性

图7为加力燃烧室不同凹腔倾斜角度 γ 下凹腔区域的速度分布云图与流线图。从图7可以看出,气流流经凹腔结构时,由于凹腔结构存在突扩区,会在凹腔中形成一个封闭的回流区。而随着 γ 的增大回流区结构基本无变化。

图8为不同凹腔倾斜角度 γ 下的轴向零速度等值线。从图8可以看出,除了 $\gamma=40^\circ$ 时由于壁面的抬升导致轴向零速度线脱离内壁外,回流区的起始点位置、结构与尺寸基本相近。

图9为不同凹腔深度 h 下的回流率。其中,回流率为回流流量与总质量流量的比值。从图9可以看出,在 γ 不变的情况下随着 h 的增大凹腔内的回流率明显增大且增大趋势愈发明显。

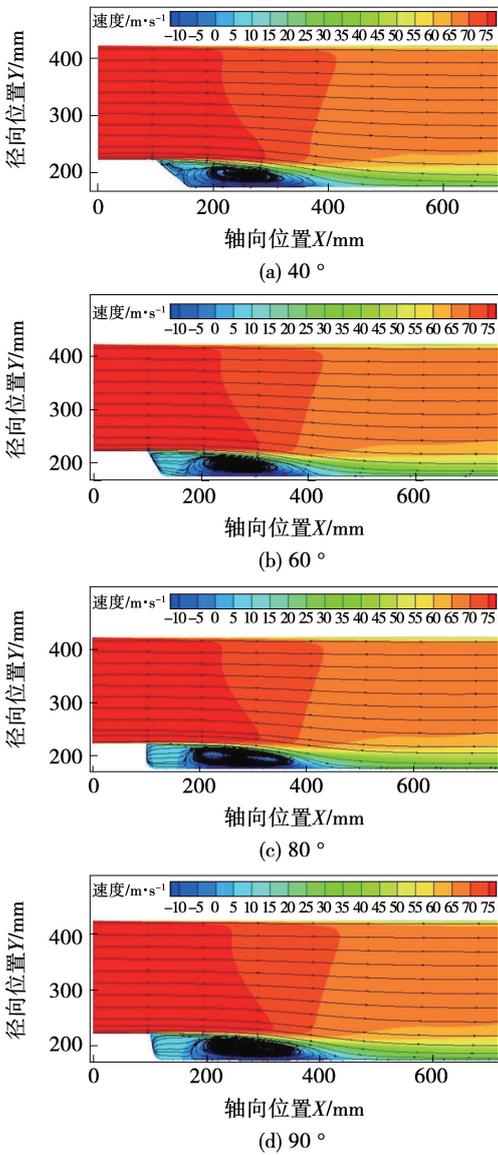


图 7 矩形流道内速度分布云图与流线图 ($h = 47 \text{ mm}$)

Fig. 7 Velocity contours and streamlines in rectangular channel ($h = 47 \text{ mm}$)

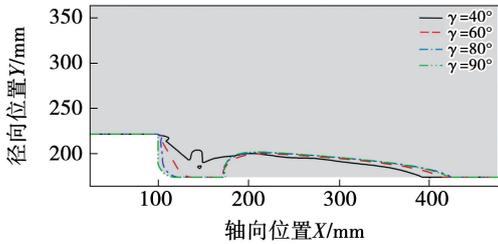


图 8 矩形流道内轴向零速度线 ($h = 47 \text{ mm}$)

Fig. 8 Axial zero velocity lines in rectangular channel ($h = 47 \text{ mm}$)

图 10 为不同凹腔倾斜角度 γ 与不同凹腔深度下总压恢复系数的统计结果。从图 10(a)中可以看出,随着 γ 逐渐增大 σ 基本无变化。因此,可以认

为 γ 对 σ 基本没有影响。从图 10(b)可以看出,随着 h 的增加 σ 大幅下降。

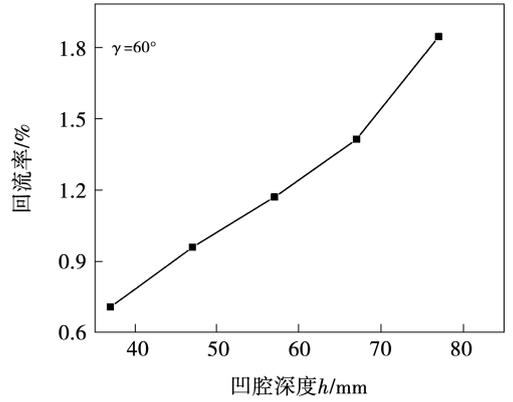
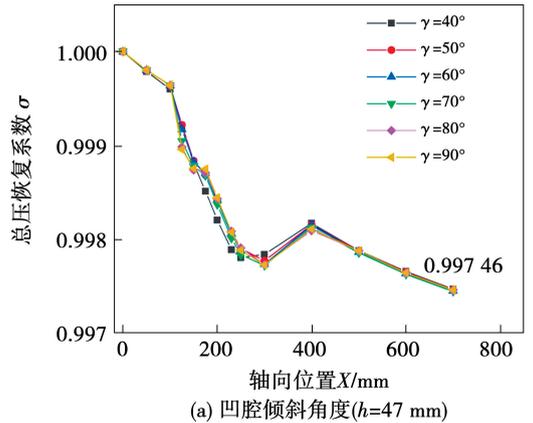
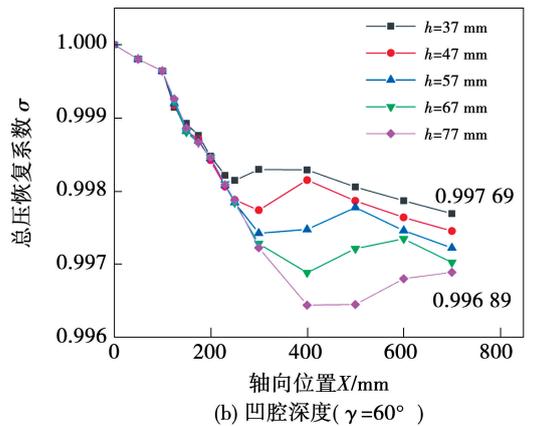


图 9 不同凹腔深度下凹腔内的回流率

Fig. 9 Reflux rate in cavity with different depths



(a) 凹腔倾斜角度 ($h = 47 \text{ mm}$)



(b) 凹腔深度 ($\gamma = 60^\circ$)

图 10 不同凹腔结构参数下的总压恢复系数

Fig. 10 Total pressure recovery coefficients under different structural parameters of cavity

从图 10 可以看出,对于凹腔而言,凹腔倾斜角度 γ 对凹腔流场结构和总压恢复系数的影响较小,影响凹腔流阻损失的主要参数为凹腔深度 h 。因此,设计过程中应在保证凹腔点火性能的前提下尽

量减小 h , 从而降低流阻损失。

3.2 支板火焰稳定器流场特性

本文选取计算结果展示截面如图 11 所示。图 11(a) 中, $Z=0$ mm 截面为轴向支板中心截面, $Y=370$ mm 截面为过支板周向截面。图 11(b) 中, S1 截面是支板火焰稳定器下沿截面, 流过该截面的质量流量主要进入凹腔中, S2 截面是支板火焰稳定器尾缘主流方向截面, 通过该截面的质量流量在支板尾缘形成回流区结构。

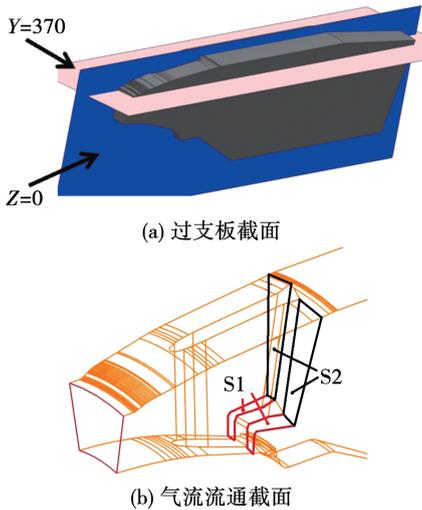


图 11 展示截面位置示意图

Fig. 11 Location diagrams on characteristic sections

图 12 为支板尾缘扩张角度 $\alpha=5^\circ$ 时, 不同支板宽度下 $Z=0$ mm 截面轴向零速度等值线分布图。

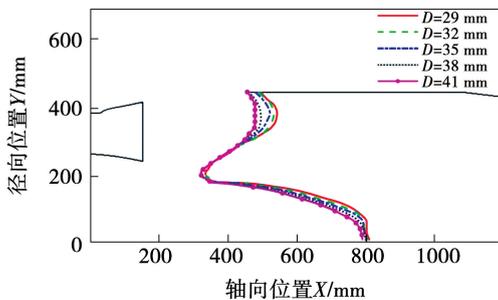


图 12 不同支板宽度下 $Z=0$ mm 截面轴向零速度等值线 ($\alpha=5^\circ$)

Fig. 12 Axial zero velocity lines on $Z=0$ mm cross-section under different strut widths ($\alpha=5^\circ$)

从图 12 中可以看出, 随着 D 的增加支板火焰稳定器尾缘回流区逐渐增大。同时, 由于加力燃烧室扩压段的通流面积减小, 支板火焰稳定器后气流速度增加, 高速气流的剪切作用对凹腔 - 中心锥处的低速回流区形成向上的卷吸, 使此处回流区也略微增大。

图 13 为不同支板宽度下的总压恢复系数。可以看出, 随着 D 的减小, 出口处的 σ 单调减小, 从 0.993 5 降低到 0.988 9。因此, 在保证支板内部空间能满足点火器和喷油杆等结构件安装要求的前提下, 应当尽可能减小 D 。

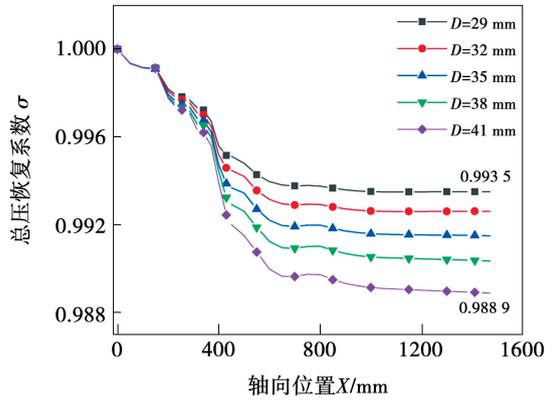
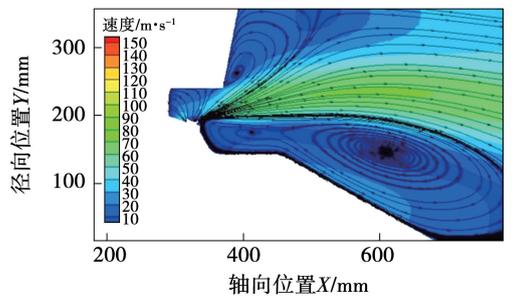


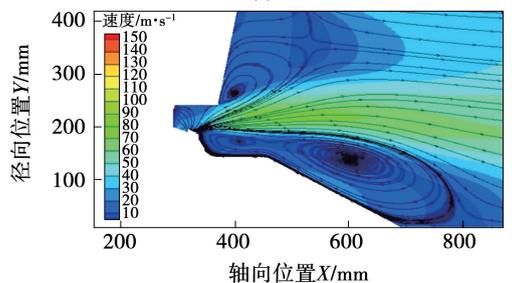
图 13 不同支板宽度下的总压恢复系数 ($\alpha=5^\circ$)

Fig. 13 Total pressure recovery coefficient under different strut widths ($\alpha=5^\circ$)

图 14 为支板宽度 $D=35$ mm 时不同支板尾缘扩张角度 α 下的速度分布云图与流线图。从图 14 可以看出, 随着 α 的增大, 支板火焰稳定器尾缘回流区轮廓逐渐变大, 支板尾缘与凹腔上方的流线逐渐向下压缩, 导致凹腔 - 中心锥的回流区逐渐减小。同时凹腔处的回流区结构发生改变, 从与中心锥回流区连成一体开式回流区逐渐过渡到一个独立封闭的闭式回流区结构。



(a) $\alpha=5^\circ$



(b) $\alpha=8^\circ$

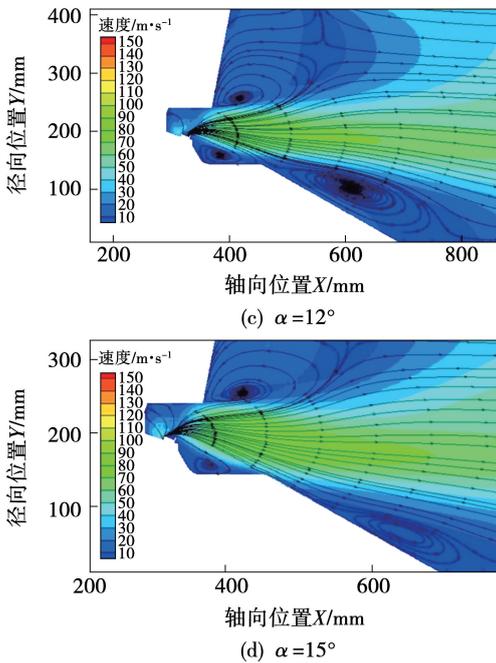


图 14 不同隔板尾缘扩张角度下的速度分布云图与流线图 ($D = 35 \text{ mm}$)

Fig. 14 Velocity contours and streamlines under different trailing edge expansion angles of struts ($D = 35 \text{ mm}$)

图 15 为 $Y = 370 \text{ mm}$ 与 $Z = 0 \text{ mm}$ 截面轴向零速度等值线分布图。

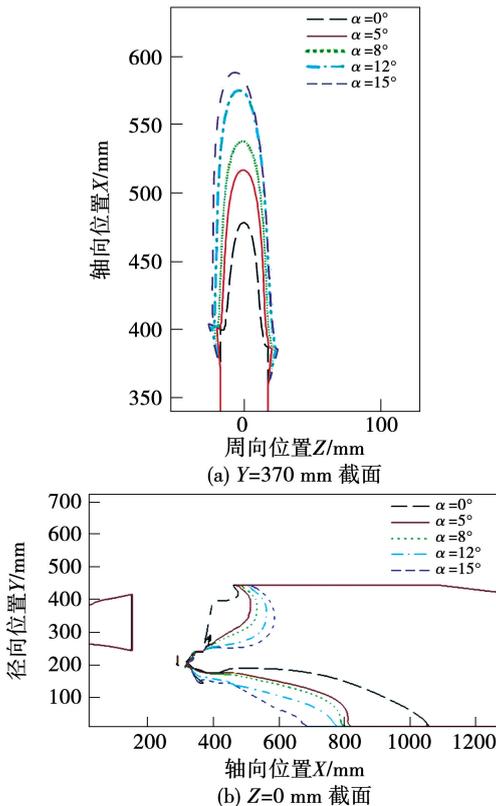


图 15 不同隔板尾缘扩张角度下参考截面轴向零速度线 ($D = 35 \text{ mm}$)

Fig. 15 Axial zero velocity lines on characteristic sections under different trailing edge expansion angles of struts ($D = 35 \text{ mm}$)

从图 15 可以看出,随着隔板尾缘扩张角度 α 的增大,隔板尾缘出口回流区宽度逐渐变大,并且轴向长度明显增加,回流区整体尺寸增加,而随着 α 增加,凹腔 - 中心锥回流区尺寸却有所减小。这说明,随着 α 的变化,燃烧室中流过隔板火焰稳定器和凹腔位置的流量分配发生了改变。

图 16 为不同隔板尾缘扩张角度 α 下加力燃烧室内的质量流量和回流率统计如图 16 所示。

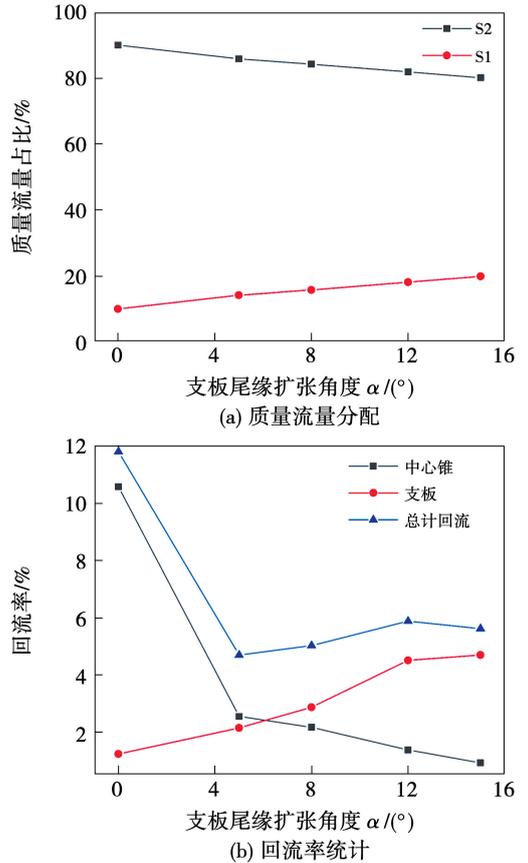


图 16 不同隔板尾缘扩张角度下的质量流量分配和回流率统计

Fig. 16 Mass flow distribution and reflux rate statistics in the integrated afterburner under different trailing edge expansion angles of struts

从图 16 可以看出, α 的增加导致 S1 截面流量占比从 9.877% 增加到了 19.799%, 意味着更多的流量流经 S1 截面, 进入了凹腔回流区。随着 α 的增加, 凹腔 - 中心锥回流区的回流率先急剧减小后趋于缓慢, 而隔板火焰稳定器尾缘回流区回流率缓慢增加, 使得总回流率在 $\alpha = 5^\circ$ 附近出现极小值。

不同隔板尾缘扩张角度下加力燃烧室总压恢复

系数如图 17 所示。可以看出,当 α 从 0° 增加到 15° 时, σ 先增大后减小,总压恢复系数在 $\alpha = 5^\circ$ 时取得最大值。

插值和经验关系式拟合的方法对支板火焰稳定器结构参数进行寻优,参数寻优结果如图 19 所示。

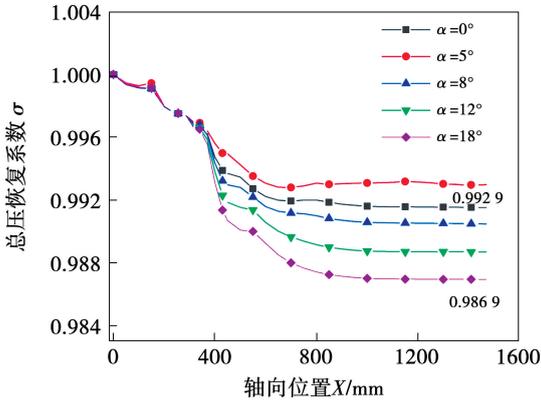


图 17 不同支板尾缘扩张角度下的总压恢复系数 ($D = 35 \text{ mm}$)

Fig. 17 Total pressure recovery coefficient under different trailing edge expansion angles of struts ($D = 35 \text{ mm}$)

采用 Liutex - 涡定义和第三代涡识别方法^[19],对加力燃烧室内的涡结构进行识别,结果如图 18 所示。从图 18 可以看出,支板火焰稳定器尾缘后以及凹腔内部涡强远大于中心锥回流区,中心锥处的回流区虽然涡结构大,但是对燃烧室内流阻损失造成的影响相对较小,因此可以认为加力燃烧室内产生总压损失的主要位置为支板火焰稳定器尾缘以及凹腔稳定装置处。

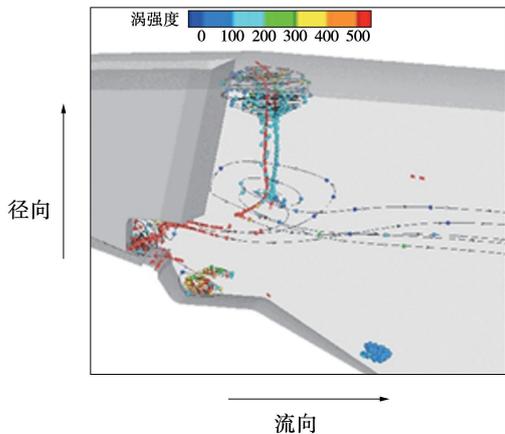
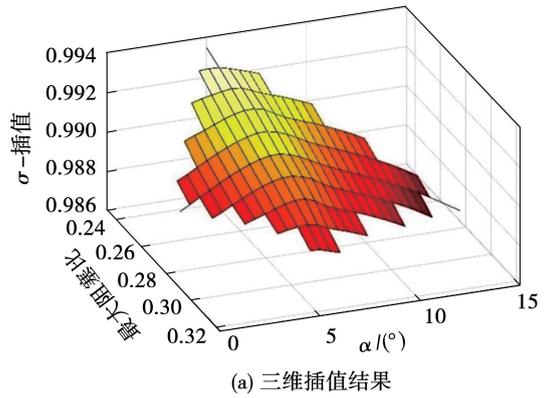


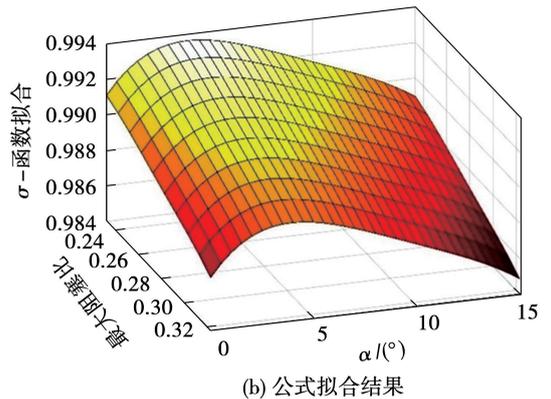
图 18 加力燃烧室内涡核结构

Fig. 18 Vortex core structure in afterburner

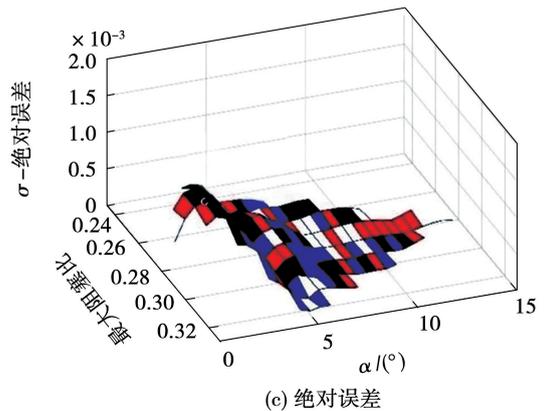
最后,利用商业数学软件 Matlab,通过三维数据



(a) 三维插值结果



(b) 公式拟合结果



(c) 绝对误差

图 19 支板火焰稳定器结构参数寻优结果

Fig. 19 Optimization results of structural parameters of flame holder of strut

从图 19(a)、19(b)可以看出,总压恢复系数 σ 随着最大阻塞比的增加单调降低,即支板宽度 D 越小时流道内流阻损失越小;当支板尾缘扩张角度 α 从 0° 增大到 15° 时, σ 先增加后降低,最优的尾缘扩张角度 α 约为 3.5° 。如图 19(c)所示,两种方法得到的总压恢复系数 σ 绝对误差的最大值为 9×10^{-4} ,说明这两种方法均准确可用。

4 结 论

对加力燃烧室凹腔稳定装置与支板火焰稳定器结构参数对流阻特性的影响规律进行了数值研究,得到以下结论:

(1) 凹腔倾斜角度对凹腔流场形态和流阻损失影响较小,影响凹腔流阻损失的结构参数主要是凹腔深度,总压恢复系数随着凹腔深度的减小而逐渐增加;

(2) 随着支板宽度的减小,燃烧室内的回流区结构减小,总压恢复系数随支板宽度的减小而单调增加。

(3) 支板尾缘和凹腔后回流区涡流强度大于中心锥位置,支板和凹腔对流阻损失的影响更大。

(4) 随着支板尾缘扩张角度的增加,支板尾缘回流区变大,而凹腔-中心锥回流区受到压缩逐渐减小;总压恢复系数在尾缘扩张角约为 3.5° 时最大。

参考文献:

[1] 谈浩元,王家骅.改进加力室 V 型火焰稳定器性能的试验研究[J].工程热物理学报,1986(2):179-181.
TAN Haoyuan, WANG Jiahua. A test research for improving the performance of V-type flameholder used in an afterburner[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1986(2):179-181.

[2] 高歌,宁 槐.沙丘驻涡火焰稳定性的理论及实验研究[J].工程热物理学报,1982(1):89-95.
GAO Ge, NING Huang. Theoretical and experimental study in stability of the barchan dune vortex flame[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1982(1):89-95.

[3] 张孝春,孙雨超,刘 涛.先进加力燃烧室设计技术综述[J].航空发动机,2014,40(2):24-30,60.
ZHANG Xiaochun, SUN Yuchao, LIU Tao. Summary of advanced afterburner design technology[J]. Aeroengine, 2014, 40(2):24-30,60.

[4] 梁春华,杨东丹,刘红霞,等.航空发动机新型补燃增推燃烧室的现状与进展[J].航空发动机,2012,38(5):1-5,17.
LIANG Chunhua, YANG Dongdan, LIU Hongxia, et al. Present and future development of advanced second burner for aeroengine[J]. Aeroengine, 2012, 38(5):1-5,17.

[5] 王玉清,秦 飞,刘振德,等.带驻涡凹腔的径向钝体稳定器燃烧特性研究[J].推进技术,2023,44(8):137-146.
WANG Yuqing, QIN Fei, LIU Zhende, et al. Combustion characteristics of radial bluff-body flameholder combined with trapped-vortex

cavity[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(8):137-146.

[6] 季鹤鸣,樊于军,杨茂林.新型内突扩加力燃烧室方案可行性分析[J].航空发动机,2006,32(1):35-37.
JI Heming, FAN Yujun, YANG Maolin. Feasibility analysis of a new inner dumped afterburner concept[J]. Aeroengine, 2006, 32(1):35-37.

[7] 陈兴良,景婷婷,朱韶华,等.支板/凹腔组合稳焰器耦合机制研究[J].推进技术,2022,43(11):193-202.
CHEN Xingliang, JING Tingting, ZHU Shaohua, et al. Coupling mechanism of strut/cavity combined flame stabilizer[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(11):193-202.

[8] 秦伟林,何小民,金 义,等.凹腔驻涡与支板稳焰组合加力燃烧室模型冷态流场试验[J].航空动力学报,2012,27(6):1347-1354.
QIN Weilin, HE Xiaomin, JIN Yi, et al. Experimental investigation on cold flow characteristics of afterburner with cavity/strut hybrid flameholders[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6):1347-1354.

[9] 陈 翔.凹腔与支板稳定组合加力燃烧室冷态流场特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
CHEN Xiang. An investigation on cold flow characteristic of afterburner with cavity/strut hybrid flameholders[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[10] 刘玉英,周春阳,谢 奕,等.一体化凹腔支板火焰稳定器贫油熄火性能初步试验[J].航空动力学报,2020,35(1):75-80.
LIU Yuying, ZHOU Chunyang, XIE Yi, et al. Preliminary experiment on the lean blow-off of an integrated cavity-based strut flameholder[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1):75-80.

[11] CLEMENTS T R, GRAVES C B. Augmentor burner; US patent 5385015[P]. 1995-01-31.

[12] 孙雨超,张志学,李江宁,等.一体化加力燃烧室方案设计及数值研究[J].航空科学技术,2011,131(4):71-74.
SUN Yuchao, ZHANG Zhixue, LI Jiangning, et al. Design and numerical research of integrated rear frame and afterburner[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011, 131(4):71-74.

[13] 姜 琴.一体化加力燃烧室性能的冷态数值研究[D].厦门:厦门大学,2019.
JIANG Qin. Numerical study on the cold flow characteristic of the integrated afterburner[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.

[14] 朱 贇,张哲衡,解 亮,等.加力燃烧室典型结构件流阻特性研究[J].航空发动机,2019,45(6):46-50.
ZHU Yun, ZHANG Zheheng, XIE Liang, et al. Study on flow resistance characteristics of typical structure parts of afterburner[J]. Aeroengine, 2019, 45(6):46-50.

- [15] 林爽,吴榕,郑睿书. 加力燃烧室一体化设计[J]. 航空动力,2020,17(6):31-34.
LIN Shuang, WU Rong, ZHENG Ruishu. Integrated design of afterburner[J]. Aerospace Power, 2020, 17(6):31-34.
- [16] 邹咪,金捷,王旭东. 带凹腔的支板火焰稳定器三维大涡模拟[J]. 航空动力学报,2017,32(3):607-613.
ZOU Mi, JIN Jie, WANG Xudong. Three-dimensional large eddy simulation of strut flame-holder with cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3):607-613.
- [17] 马立坤,李潮隆,夏智勋,等. 带凹腔火焰稳定器的固体火箭超燃冲压发动机燃烧室试验研究[J]. 推进技术:2021, 42(2):319-326.
MA Likun, LI Chaolong, XIA Zhixun, et al. Experimental investigation of solid rocket scramjet combustor with cavity flameholder [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(2):319-326.
- [18] EMERY J C, HERRIG L J, ERWIN J R, et al. Systematic two-dimensional cascade tests of NACA 65-series compressor blades at low speeds[R]. NACA-TN-3916, 1958.
- [19] 刘超群. Liutex-涡定义和第三代涡识别方法[J]. 空气动力学学报,2020,38(3):413-431,478.
LIU Chaoqun. Liutex-third generation of vortex definition and identification methods [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(3):413-431,478.

(丛敏 编辑)

(上接第10页)

- [63] KODAMA T, GOKON N, MATSUBARA K, et al. Flux measurement of a new beam-down solar concentrating system in Miyazaki for demonstration of thermochemical water splitting reactors[J]. Energy Procedia, 2014, 49:1990-1998.
- [64] MATSUBARA K, KAZUMA Y, SAKURAI A, et al. High-temperature fluidized receiver for concentrated solar radiation by a beam-down reflector system[J]. Energy Procedia, 2014, 49:447-456.
- [65] BRIONGOS J V, GÓMEZ-HERNÁNDEZ J, GONZÁLEZ-GÓMEZ P A, et al. Two-phase heat transfer model of a beam-down gas-solid fluidized bed solar particle receiver[J]. Solar Energy, 2018, 171:740-750.
- [66] SARKER M R I, MANDAL S, TULY S S. Numerical study on the influence of vortex flow and recirculating flow into a solid particle solar receiver[J]. Renewable Energy, 2018, 129:409-418.
- [67] GÓMEZ-HERNÁNDEZ J, GONZÁLEZ-GÓMEZ P Á, SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, et al. Integration of a solar linear particle receiver with a gas turbine [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2126(1):060004.
- [68] GÓMEZ-HERNÁNDEZ J, GONZÁLEZ-GÓMEZ P Á, NI-SONG T, et al. Design of a solar linear particle receiver placed at the ground level[J]. AIP Conference Proceedings, 2018, 2033(1):170005.
- [69] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, GÓMEZ-HERNÁNDEZ J. Beam-down linear Fresnel reflector: BDLFR [J]. Renewable Energy, 2020, 146:802-815.
- [70] KONG W, WANG B, BAEYENS J, et al. Solids mixing in a shallow cross-flow bubbling fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 187:213-222.

(姜雪梅 编辑)